

# 气候暖湿变化对黑河流域绿洲农业生产的影响

马红勇<sup>1,2</sup>, 庞成<sup>1</sup>, 白青华<sup>1</sup>, 张洁<sup>1</sup>, 张峰<sup>1</sup>, 褚超<sup>1</sup>, 郑学金<sup>1</sup>

(1. 甘肃省张掖市气象局, 甘肃 张掖 734000;

2. 中国气象局兰州干旱气象研究所, 甘肃省干旱气候变化与减灾重点实验室,

中国气象局干旱气候变化与减灾重点开放实验室, 甘肃 兰州 730020)

**摘要:** 利用黑河流域上中游6个气象台站1959—2009年气象资料, 黑河50年流量资料及张掖市30年小麦、玉米生育资料, 探讨流域气候变暖、增湿背景下农业气候条件、水文特征变化对农作物种植结构、作物布局、生育期进程和产量的影响。研究表明: 近50年黑河流域增温趋势明显, 中、上游地区增温趋势尤为显著, 其上游地区倾向率最大, 达 $0.53\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot 10\text{a}^{-1}$ , 中游地区达 $0.35\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot 10\text{a}^{-1}$ ; 热量条件好转,  $\geq 0^{\circ}\text{C}$ 积温, 上游、中游、中下游分别比60年代增加 $151.1^{\circ}\text{C}$ 、 $387.6^{\circ}\text{C}$ 、 $247.3^{\circ}\text{C}$ ; 降水趋势中游地区变化平缓, 中、上游地区秋、冬两季明显增加, 其倾向率中游地区达 $3.38\text{ mm}\cdot 10\text{a}^{-1}$ , 上游地区达 $13.87\text{ mm}\cdot 10\text{a}^{-1}$ ; 气候变暖、增湿有利于农业生产发展, 使农业生产潜力增大, 但水、热不同季, 时空差异大, 使易受春旱和春末夏初干旱威胁的高耗水、喜温凉气候的春小麦、水稻等作物产量增长趋势变缓, 生育进程加快, 发育期缩短, 近10年春小麦发育期比20世纪80年代平均缩短了4 d, 适宜种植区面积减小, 品质下降; 而品质好, 经济效益高且喜温的玉米、棉花适宜种植区面积扩大, 种植海拔上限提升, 玉米中晚熟品种种植适宜区上限高度已由海拔1500 m提升到海拔1800 m左右, 作物发育期延长, 近10年发育期比20世纪80年代延长了13 d, 产量提高; 气候湿润指数呈周期性波动性变化, 20世纪80年代中期以前呈波动性上升趋势, 以后由于流域内增温幅度大于增湿幅度, 水、热增长趋势失衡, 使得气候湿润指数缓慢下降。导致高山冰川、积雪融化速度加快, 河流来水量增加, 水资源过度消耗, 对流域内绿洲农业可持续发展影响巨大。

**关键词:** 黑河流域绿洲; 暖湿变化; 农业生产; 生育期; 水资源

**中图分类号:** S162.5 **文献标志码:** A

## Influence of climate warming and humidifying to oasis agricultural production in Heihe River basin

MA Hong-yong<sup>1,2</sup>, PANG Cheng<sup>1</sup>, BAI Qing-hua<sup>1</sup>, ZHANG Jie<sup>1</sup>,  
ZHANG Feng<sup>1</sup>, CHU Chao<sup>1</sup>, ZHENG Xue-jin<sup>1</sup>

(1. Zhangye Meteorological Bureau, Zhangye, Gansu 734000, China;

2. Lanzhou Institute of Arid Meteorology of CMA, Key Laboratory of Arid Climatic Change and Disaster Reduction of Gansu Province, Key Open Laboratory of Arid Climate Change and Disaster Reduction of CMA, Lanzhou, Gansu 730020, China)

**Abstract:** Based on the data of 6 meteorological observation station at the upstream and midstream of Heihe River from 1959 to 2009, the flow data of Heihe River 50 years, wheat and maize's growth data of 30 years in Zhangye, in order to investigate what influence will happen to the Crop planting structure, crop layout, process of growth period and yield at the climate warming, humidifying background conditions of agricultural climate changes and The change of hydrological characteristics. Research shows that: basin warming trend is obvious In recent 50 years Heihe, especially the upstream and midstream, the upstream at a rate of  $0.53\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot 10\text{a}^{-1}$ , middle area is  $0.35\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot 10\text{a}^{-1}$ ; The heat condition improved markedly, Greater than  $0^{\circ}\text{C}$  of accumulated temperature of upstream, midstream and downstream reaches  $151.1^{\circ}\text{C}$ ,  $387.6^{\circ}\text{C}$ ,  $247.3^{\circ}\text{C}$ ; The variation trend of precipitation over the middle area area is flat, the upstream area increased significantly in autumn and winter, up to  $3.38\text{ mm}\cdot 10\text{a}^{-1}$  at the middle region and  $13.87\text{ mm}\cdot 10\text{a}^{-1}$  upstream; Climate warming, humidifying is advantageous to the development of agricultural production, increased agricultural production potential; But the water, heat in different season, temporal and spatial difference is big, leading to

Spring wheat, rice and other crops yield growth trend got slowly, The growth process got fast, puberty got shortly which was susceptible threatened by the drought at spring and Late spring or early summer, the growth period Spring wheat has shortened four days than in the 1980s average in recent 10a, at the same time, the suitable area is reduced, quality decline; and which is at good quality and high economic benefit and thermophilic, such as maize and cotton, suitable area is expanding, The altitude of planting is improving, the Planting suitable ceiling height of late varieties of maize has Upgraded from an elevation of 1 500 m to about 1 800 m, crop growth period prolonged developmental duration, nearly 10 years of development period has been extended 13 days more than 80 years of last century, yield increasing obviously; Humid climate index fluctuates periodically change, A rising volatility trend was found in The mid 80's of last century, after this temperature increases faster than humidity in this basin, water and heat shows imbalance growth trend, which lead to the humid climate index declined slowly. As a result, mountain glaciers and snow melting speed, river water increase, water resource was consumed excessively, which made huge influence to oasis agriculture sustainable development.

**Keywords:** Heihe River basin oasis; the warm and wet changes; agricultural production; growth period; water resources

气候变化越来越引起全球民众的普遍关注。农作物对气候变化的适应是全球变化研究的重要内容之一,不断加剧的气候变化将对农业生产产生重大影响,直接威胁到人类社会的可持续发展。为适应气候变化,应对气候变化情景下农作物改进种植技术和栽培措施,减轻气候变化对农业的影响,保持农作物产量持续稳定增长,使农业在气候变化过程中可持续发展具有重要意义。20世纪60年代以竺可桢为代表的一批科学家用气候相似法做了许多气候对农作物发育进程、种植区域等影响的研究,近年来,国内外有关专家对气候变化对农作物影响开展了广泛研究,其中的许多研究都与生长周期及产量有关联,如生育期改变、生产力下降、物种迁移,种植区域地理转移等,张厚宣<sup>[1]</sup>、王馥棠<sup>[2]</sup>等用数学描述、模式模拟等方法研究认为气温、降水变动从整体上看,一定幅度内的气温上升和降水增加对中国粮食产量变动有正向作用,玉米、棉花等喜温作物种植线北移,种植海拔高度上限提高等。王春乙等<sup>[3]</sup>用统计模拟方法分析了气候变化情景下农作物生长和生物量、气候生产潜力、产量的影响及预测具有很高实用价值。

近年来,随着工业化进程不断加快,全球气候变暖趋势更加明显,我国近百年增温 $0.5^{\circ}\text{C} \sim 0.8^{\circ}\text{C}$ ,尤以北方增温最为显著<sup>[4-5]</sup>,在这种大气候背景影响下,地处青藏高原和黄土高原结合部的黑河流域气候正在发生较为显著的变化,突出表现在气候向暖、湿化发展的趋势日益明显,从1985年至2009年25年间,流域内已连续经历了19个暖冬,暖、湿变化对环境脆弱区农业生产将会产生重大影响,黑河流域地区是我国西北重要的粮食主产区,也是气候

变化极度敏感区,农业生产对气候的依赖性比较大,任何一项气象要素发生变化都会对粮食生产产生一定影响,气候暖、湿变化通过对农业气候条件的改变将影响农作物生长,适宜种植区面积、气候生产潜力、产量和品质等<sup>[6]</sup>。本文着重对黑河流域绿洲气候暖湿变化对本区域农业气候条件、水文环境、作物发育进程变化及产量等方面问题进行进一步研究分析,为流域有效应对气候暖、湿变化,寻求适应气候变化的农业生产方式,积极利用气候变化对农业带来的机遇,调整种植结构,合理利用气候资源,防御农业气象灾害,保证农业可持续发展提供科学依据。

## 1 研究区概况

黑河流域是我国西北地区第二大内陆河流域,位于河西走廊中部,地理位置介于 $98^{\circ} \sim 101^{\circ}30' \text{E}$ ,  $38^{\circ} \sim 42^{\circ}\text{N}$ 之间,为甘蒙西部最大的内陆河流域。黑河发源于南部祁连山区,由莺落峡进入走廊平原为黑河(干流)的上游。黑河从莺落峡进入河西走廊,于张掖市城西北10 km附近,纳山丹河、洪水河,流向西北,经临泽、高台汇梨园河、摆浪河穿越正义峡,进入阿拉善平原。莺落峡至正义峡为黑河(干流)的中游。黑河流经正义峡谷后,在甘肃金塔县境内的鼎新与北大河汇合注入西居延海。黑河流域气候具有明显的东西差异和南北差异,上游南部祁连山区,属高寒半干旱气候,年平均气温 $2.0^{\circ}\text{C} \sim 1.5^{\circ}\text{C}$ ,年降水量在200 mm以上,最高达700 mm,降水量由东向西递减,雪线高度由东向西逐渐升高。中下游绿洲属大陆性中温带干旱气候,年均温度 $3.4^{\circ}\text{C} \sim 8.0^{\circ}\text{C}$ ,年降水量100~350 mm,年均蒸发量1 600~2 400 mm,日照时数2 700~3 200 h,年太阳辐射总

量为  $133.36 \sim 148.42 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2}$ 。是发展农业理想的地区,但流域内降水稀少,气候干燥,水热条件分布极度不均,农业生产受气候变化影响十分明显。

## 2 资料来源与分析方法

气象资料来源于位于黑河流域上游的肃南、民乐和中游的甘州、山丹、临泽、高台气象站 1959—2009 年地面气象观测资料,黑河流域气象站点分布见图 1;春小麦、玉米发育期资料来源于张掖市气象局;产量资料来源于张掖市统计局;主要河流流量资料来源于黑河流域管理局。季节按冬季(12—2月)、春季(3—5月)、夏季(6—8月)、秋季(9—11月)划分。

本文主要采用线性倾向估计和趋势系数、Mann-Kendall 非参数趋势检验<sup>[7]</sup>、W Lang 方法<sup>[8]</sup>计算湿润系数等方法分析研究黑河流域近 50 年气温、热量条件、降水变化对流域内绿洲农作物发育进程、农作物产量、河流来水量、种植结构和布局的影响,探讨气候变暖、增湿背景下,流域内农业生产受气候变化影响的程度,进而合理开发利用气候资源,趋利辟害,对黑河流域绿洲农业可持续发展具有重要意义。

## 3 结果与分析

### 3.1 气温、热量条件变化

3.1.1 气温变化特点 以民乐、肃南(代表黑河流域上游山区)及张掖、高台(代表黑河流域中、下游绿洲) 1959—2009 年资料为例,做出 5 年滑动平均气温(图 2a、b)随时间变化图。

从图 2(a、b)和表 1 可以看出,近半个世纪来,黑河流域温度变化总的趋势是变暖,其上游地区倾向率最大,达  $0.53^\circ\text{C} \cdot 10\text{a}^{-1}$ ,中游地区达  $0.35$

$^\circ\text{C} \cdot 10\text{a}^{-1}$ ;尤其是 90 年代以后,这种趋势愈加明显,其中近 10 年来这种趋势尤为显著,不仅年平均温度高于其它年代,而且增温幅度也高于以往各年代,各季温度也是最高的;在空间分布上,流域中、上游升温趋势明显高于中、下游地区,尤其是秋、冬两季,这种趋势更加明显(均通过 0.01 显著性检验)。其中上游地区冬季温度倾向率最大,10 a 冬季温度最高升高了  $0.91^\circ\text{C}$ ,其次是秋季,春、夏两季温度倾向率稍低;中游地区冬季温度倾向率也是最大的,为  $0.45^\circ\text{C} \cdot 10\text{a}^{-1}$ ,春季次之,夏、秋季相对较低;此外还可以看出,流域上游地带温度倾向率远远大于中、下游绿洲地带。

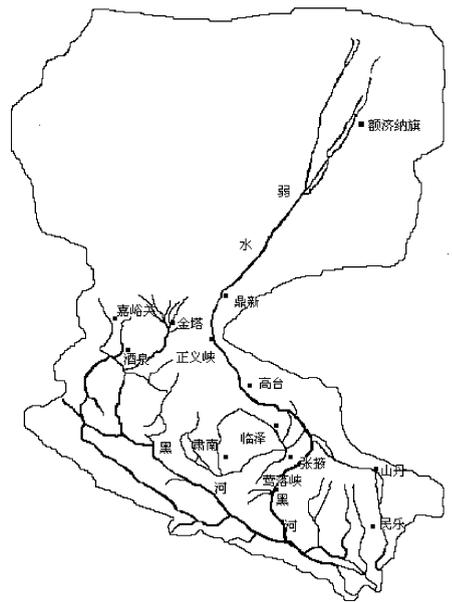


图 1 黑河流域气象站点分布

Fig. 1 Distribution of meteorological stations in Heihe River basin

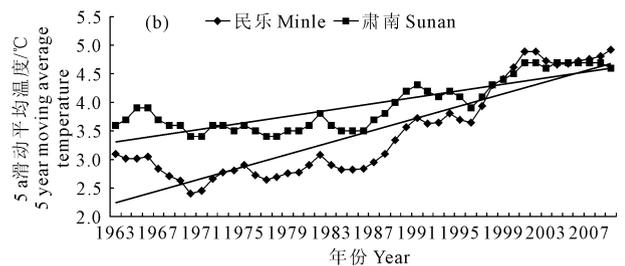
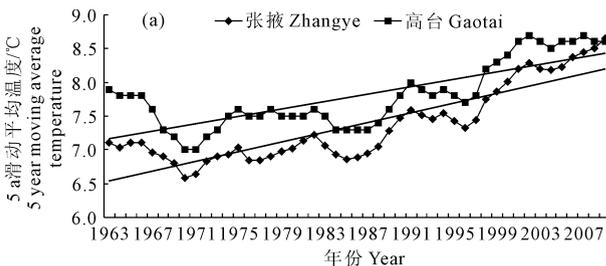


图 2 黑河流域 5 年滑动平均气温变化时间序列

Fig. 2 Heihe River basin 5 year running mean temperature change time series chart

3.1.2 农业界限积温 农业界限积温是农作物布局 and 引种的重要指标,通过分析,近 50 年来黑河流域  $\geq 0^\circ\text{C}$ 、 $\geq 10^\circ\text{C}$  积温总体呈增加趋势,尤其是 1985 年以后,增加趋势更加显著。以  $\geq 0^\circ\text{C}$  积温为例,流域内各地  $\geq 0^\circ\text{C}$  积温 60 年代在  $2\ 285.9^\circ\text{C} \sim$

$3\ 566.5^\circ\text{C}$ , 平均值  $2\ 898.2^\circ\text{C}$ ; 70 年代在  $2\ 220.0^\circ\text{C} \sim 3\ 476.4^\circ\text{C}$ , 均值  $2\ 828.0^\circ\text{C}$ ; 80 年代  $2\ 267.6^\circ\text{C} \sim 3\ 477.7^\circ\text{C}$ , 均值  $2\ 867.8^\circ\text{C}$ ; 90 年代在  $2\ 443.1^\circ\text{C} \sim 3\ 601.8^\circ\text{C}$ , 均值  $3\ 005.4^\circ\text{C}$ ; 2001—2009 年在  $2\ 514.5^\circ\text{C} \sim 3\ 813.8^\circ\text{C}$ , 均值  $3\ 165.3^\circ\text{C}$ ; 2001—2009

年平均积温上游、中游、中下游积温分别比 60 年代增加 151.1℃、387.6℃、和 247.3℃,流域平均值分别比 60、70、80、90 年代增加 267.3℃、337.3℃、297.5℃和 159.9℃;流域上游、中游和中下游地区线性倾向率分别为  $50.48 \cdot 10a^{-1}$ 、 $84.69 \cdot 10a^{-1}$ 、 $49.58 \cdot 10a^{-1}$ ,中游地区增幅明显大于上游山区和下游地区。从图 3 可见,流域上游积温突变出现在 1996 年,1962—

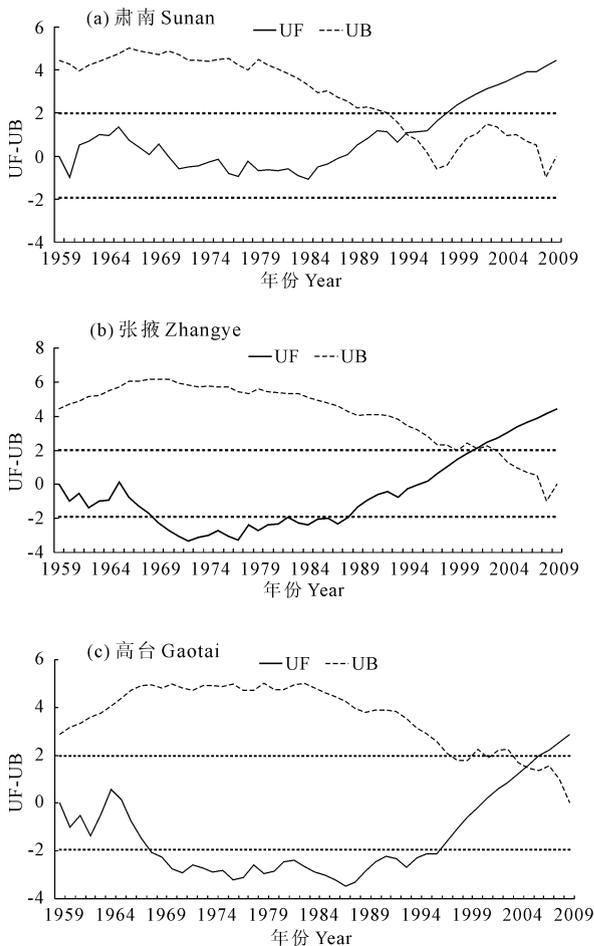
1966 年呈显著性增加趋势,1966—1985 年积温呈减少趋势,1985 年开始呈持续增加趋势,1996 年突变后积温持续增多,2000 年开始呈显著增加趋势,且达到极显著性水平。中游积温突变点出现在 2002 年,1959—1978 年积温呈减少趋势,1978 以后呈增多趋势,其中 1978—1982 年开始呈显著增加趋势,2002 年突变后积温趋势增加明显,2004 年开始呈显

表 1 黑河流域各站 5 年滑动平均气温倾向率( $^{\circ}C \cdot 10a^{-1}$ )及相关系数

Table 1 Heihe River basin 5 year running mean temperature tendency rate and correlation coefficient

区域 Region	春季 Spring	夏季 Summer	秋季 Autumn	冬季 Winter	全年 The whole year	相关系数 Correlation coefficient
高台 Gaotai	0.152**	0.073*	0.116**	0.381**	0.183**	0.7788**
临泽 Linze	0.387**	0.324**	0.221**	0.447**	0.345**	0.9214**
张掖 Zhangye	0.233**	0.213**	0.207**	0.433**	0.270**	0.8270**
山丹 Shandan	0.250**	0.188**	0.509**	0.856**	0.451**	0.9399**
民乐 Minle	0.303**	0.314**	0.591**	0.914**	0.530**	0.8889**
肃南 Sunan	0.151**	0.220**	0.338**	0.437**	0.286**	0.7492**

注: \* 通过 0.05 信度, \*\* 通过 0.01 信度。 Note: \* by 0.05 reliability, \*\* by 0.05 reliability.



注: 直线  $\alpha = 0.05$  显著性水平临界值, 下同。

Note: Linear  $\alpha = 0.05$  level critical value. The same below.

图 3 黑河流域积温 Mann-Kendall 统计量曲线

Fig. 3 The Mann-Kendall statistical quantity curve of accumulated temperature in Heihe River basin

著增加趋势,且达到显著性水平。流域中、下游积温突变点出现在 2006 年,1962—1988 年呈波动减少趋势,其中 1971—1988 年呈显著减少趋势,且达到显著性水平,1988 年开始呈持续增加趋势,且 1988—1998 年呈显著增加趋势,达到极显著水平,2006 年突变后增加趋势更加明显。

### 3.2 降水变化特征

通过对黑河流域中、上游 6 个站点年、季降水量资料统计分析,从图 4(a、b)可以看出,黑河流域降水总体呈增长趋势,说明近半个世纪以来,流域有增湿的趋势,其倾向率中游地区最大达  $3.38 \text{ mm} \cdot 10a^{-1}$ ,增幅不太显著,上游地区最大达  $13.87 \text{ mm} \cdot 10a^{-1}$ ,增幅明显大于中、下游地区,增湿程度比较显著,其中 50 年代、70—80 年代流域内降水量相对较多,60 年代和 90 年代,降水相对较少,2000 年以后明显增加,是历史上最多时期。从季节、时间分布看,春、秋季降水总的趋势是增加的,其中 60—70 年代为最低,80 年代略有增加,2000 年以后明显增加;夏季各年代降水量变化不是太明显;冬季 2000 年以前变化较小,2000 年后明显增多,达到近 50 年来的最大值。从以上分析可以看出,黑河流域近 10 年来无论是年降水量,还是各季降水量都处在最多时期,目前该地区正处于一个多雨时期。

### 3.3 湿润指数的变化趋势

湿润指数能够客观反映一个地区水热平衡状况,是判断某一地区气候干旱与湿润状况的比较好的指标之一<sup>[8-9]</sup>,同时能够客观反映气候暖、湿变化对农业生产的影响。本文采用 W Lang 方法<sup>[8]</sup>计算

湿润系数  $HI$ , 用以下关系式表示:

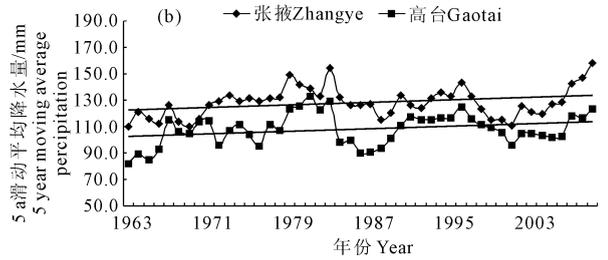
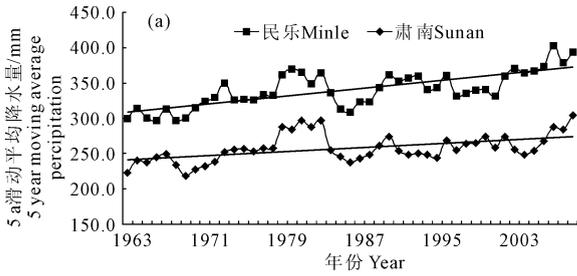


图 4 黑河流域上中游 5 年滑动平均降水量时间序列

Fig. 4 The time series plot of five years sliding average precipitation in the upper and middle Heihe River basin

$$HI = \frac{R}{T^0}$$

式中,  $HI$  表示湿润指数;  $R$  为年降水量;  $T^0$  为年平均温度。

从图 5(a、b、c)中可以看出,黑河流域湿润系数在 20 世纪 80 年代中期以前呈波动上升趋势,80 年代中期以后总体呈波动下降趋势,尤其是 1995 年以来下降趋势日趋明显。上游祁连山区湿润指数突变点出现在 1992、1993、1995 年,1962—1984 年呈波动上升趋势,1984 年开始呈持续下降趋势,1995 年突变后下降趋势明显。中游突变点出现 1998、2007、2008 年,1963—1980 年呈波动上升趋势,1981 年开始呈下降趋势,1997 年突变后下降趋势更加显著。中下游突变点出现 1960、1961、1963、2005、2007 年,1963—1984 年呈波动性上升趋势,1984—2007 年呈波动性下降趋势,其中 1984—1988 年、1997—2007 年呈显著下降趋势,2007 年突变后略有上升。流域湿润指数线性倾向率上游地区达  $13.07/10a$ ,中游地区只有  $0.69/10a$ ,上游下降趋势明显大于中游绿洲区域,说明黑河流域在 80 年代中期以前地表有向暖湿化发展的趋势,80 年代中期以后由于升温幅度明显大于增湿幅度,增温、增湿幅度失衡,且存在明显的时空差异,水、热不同季,导致湿润指数呈波动性缓慢下降趋势。此外还说明整个流域增温、增湿趋势在 20 世纪 80 年代中期发生了转变,地表正在由向暖湿化发展趋势转变为向干旱化发展趋势,只是这种趋势不太明显,比较平缓。

### 3.4 流域河流来水量

黑河流域中下游地区,降水稀少,年降水量大部分地区在 130 mm 以下,蒸发却高达 1 700 ~ 2 100 mm,因此内陆河来水量主要依靠祁连山区降水和冰川、积雪消融及地下水补给。祁连山高山区域降水量较大,在海拔 1 800 ~ 3 000 m 的中低山区,降水量在 200 ~ 400 mm 之间,而海拔 3 000 m 以上的高山

区,降水量达 400 ~ 600 mm,由此可以看出,山区降水量是决定内陆河流量最主要的因素,另外,山区冰雪也是有降水量补给的<sup>[10]</sup>。

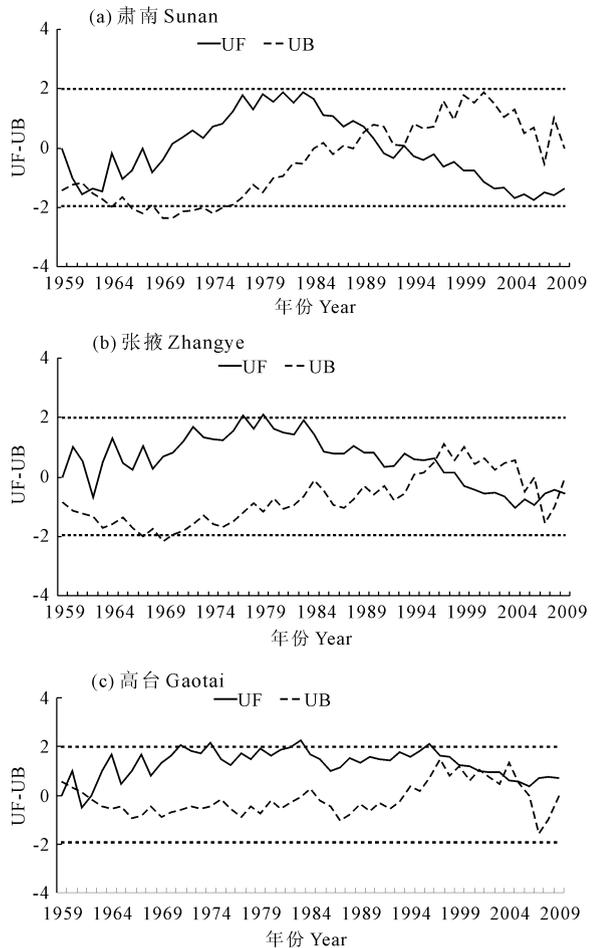


图 5 黑河流域上中游年湿润指数 Mann - Kendall 统计量曲线

Fig. 5 The Mann - Kendall statistical quantity curve of annual humid index in the upper and middle Heihe River basin

由于黑河流域上游地区气温升高,降水增多,气候暖、湿化明显,使黑河径流量增加,由图 6a 可以看出,黑河干流历年出山口径流量总体呈增加趋势,20 世纪 60 年代平均为  $15.0 \times 10^8 \text{ m}^3$ ,70 年代平均为

$14.8 \times 10^8 \text{ m}^3$ , 是近 50 年来径流量最少的时期, 80 年代平均为  $17.4 \times 10^8 \text{ m}^3$ , 90 年代径流量较 80 年代略有减少, 为  $15.7 \times 10^8 \text{ m}^3$ , 本世纪近 10 年黑河出山口径流量明显增加, 平均为  $17.5 \times 10^8 \text{ m}^3$ , 是近 50 年来最多的, 比历史上最少时期径流量增加了  $2.7 \times 10^8 \text{ m}^3$ , 计算线性倾向率为  $0.57 \times 10^8 \text{ m}^3 \cdot 10\text{a}^{-1}$ 。这与近 30 年来黑河流域上游地区增温增湿趋势完全吻合。通过对黑河干流出水口正义峡径流量进行统计分析, 近 50 年来黑河干流出水口径流量总体呈减少趋势, 线性倾向率为  $-0.57 \times 10^8 \text{ m}^3 \cdot 10\text{a}^{-1}$ , 由 20 世纪

60 年代的  $11.09 \times 10^8 \text{ m}^3$ , 减少到 90 年代的  $7.55 \times 10^8 \text{ m}^3$ , 减少了  $3.54 \times 10^8 \text{ m}^3$ , 这与该时期黑河流域上中游地区工农业生产对水资源需求大幅增加有直接关系, 进入 21 世纪, 黑河出水口径流量较前期明显改善。平均径流量达  $10.13 \times 10^8 \text{ m}^3$ , 比历史最少时期增加了  $2.58 \times 10^8 \text{ m}^3$ , 主要原因是近 10 年中上游地区为改善下游生态环境, 大力加强黑河流域综合治理, 实施跨区域调水, 调整农作物种植比例和灌溉模式, 开发地下水资源的成果。

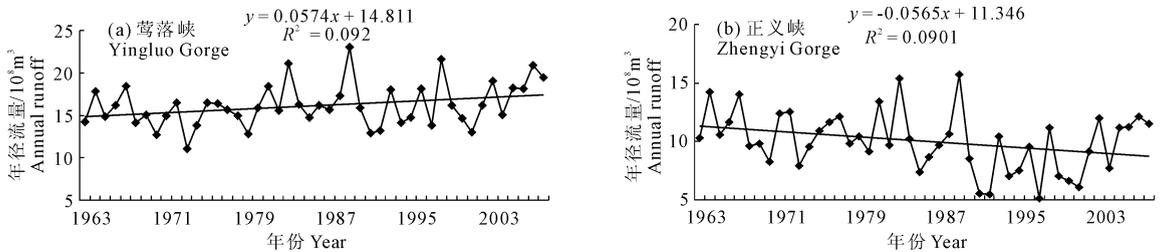


图 6 黑河流域出山口径莺落峡径流量(a)和下游出水口径正义峡径流量(b)历年变化

Fig. 6 The annual changes of runoff in Yingluo Gorge pass (a) and runoff in Zhengyi Gorge pass (b) in Heihe River basin

### 3.5 对制约流域农业发展水资源的影响

通过对黑河流域上游山区降水量与黑河来水量资料进行相关分析, 山区降水量与黑河来水量存在显著的正相关关系(通过了 0.01 显著性检验), 相关系数达 0.55, 从黑河出山口径莺落峡径流量变化趋势(图 6a)中可以看出, 随着流域上游祁连山区降水增加, 黑河来水量增加趋势明显。近 20 年来黑河流域气候暖化进程加快, 导致黑河上游祁连山区冰川、积雪加速消融, 据有关部门统计, 祁连山局部区域雪线以年均  $2 \sim 6.5 \text{ m}$  的速度上移, 个别地区的雪线上移年均竟达  $12.5 \sim 22.5 \text{ m}$ , 冰川加速消融, 利于增加河流来水和地下水位升高, 短期来看对下游绿洲农业发展有利, 但长远来看, 是对水资源的提前利用, 有关专家经过计算, 黑河流域气温与水资源总量有一定的反相关性, 气温每升高  $1^\circ\text{C}$ , 水资源总量减少  $3.1\%$ <sup>[11]</sup>, 虽然流域上游气候变暖、增湿进程加快, 对中、下游农业发展有一定正向作用, 但通过对水、热平衡状态进行分析, 近 30 年流域内升温幅度明显大于降水增加的幅度, 且上游地区表现的特别明显, 这种水、热增长失衡, 直接导致上游地区有限的水资源超前过度消耗, 如果不能及时得到补充、改善, 水资源将成为制约黑河流域农业发展的主要问题, 应引起高度关注。此外温度升高还使黑河流域蒸发能力加强, 水资源消耗加剧。

### 3.6 对农作物产量和农业种植制度的影响

气候条件变化是影响黑河流域农作物产量、品质和种植制度最主要的因素之一。近几十年来, 黑河流域气温升高明显, 尤其是秋、冬两季温度增幅显著, 气温升高, 使晚霜冻结束时间提前, 早霜冻时间推迟, 无霜期日数明显增加, 农作物生长季节活动积温增加, 热量条件对农作物生长的限制作用明显降低, 对增加喜温农作物产量, 提高农产品品质非常有利, 近 20 多年来, 黑河流域范围内粮食产量稳步提高, 已连续多年获得大丰收, 说明农作物增产丰收与该地区气温持续升高有着密切的关联。但由于流域内水、热增长幅度有一定差异, 增温幅度明显大于增湿幅度, 且存在水、热增长不同季这一矛盾, 对流域内农业生产有一定影响, 尤其是对夏播农作物影响较大, 主要表现在春末夏初农作物需水关键期, 由于河流来水总量制约, 加之中、下游地区工业用水明显增大, 有限的水资源在短时间内不能满足大面积处于需水高峰期的春小麦正常生长需求, 水分供求矛盾突出, 使流域内春小麦生长发育和产量受到影响。为了解决水、热增长失衡且不同季这一矛盾, 根据气候变化适时调整农作物种植比例和布局, 小麦面积由 80 年代的  $9.11 \times 10^4 \text{ hm}^2$  减少到 2009 年的  $4.39 \times 10^4 \text{ hm}^2$ , 减少近 50% 左右。而生长前期耗水低, 喜温且经济效益比较高的玉米、棉花面积明显增加

(图 7), 播种面积由 20 世纪 80 年代的  $1.54 \times 10^4 \text{ hm}^2$  猛增到 2009 年的  $5.63 \times 10^4 \text{ hm}^2$ , 其中制种玉米近 10 年开始大面积推广, 目前面积已接近  $4.65 \times 10^4 \text{ hm}^2$ , 占粮食播种面积的 40% 左右, 成为该区域内播种面积最大作物。气候变化对流域内农作物适宜种植区有了根本性的改变。20 世纪 80 年代以来, 流域内气候条件变化显著, 增温趋势明显, 处于中、下游地区的春小麦关键生育期温度超出适宜范围, 春旱、春末夏初干旱、高温、干热风发生几率增大, 致使小麦等喜温凉气候的农作物适宜种植区域面积减少; 流域下游海拔 1 300 m 左右地区, 90 年代前由于热量条件限制, 不适宜种植喜温作物棉花, 棉花产量不高, 一般平均单产皮棉  $150 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$  左右, 加之品质差, 1980 年以后不再种植, 进入 90 年代后, 随着种植技术和热量条件的改善, 目前棉花种植面积已增加到  $2.15 \times 10^4 \text{ hm}^2$ , 单产达  $2\,700 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。另外, 玉米中晚熟品种种植适宜区上限高度已由海拔 1 500 m<sup>[10]</sup> 提升到海拔 1 800 m 左右, 目前该区海拔

1 600 ~ 1 800 m 地带已大面积种植玉米, 喜温农作物适宜种植区面积明显增大。气候资源的改变, 还使以前那种单一的种植方式正在被高效、立体、优质的现代农业生产方式替代。另一方面, 暖冬对冬小麦等越冬农作物安全越冬有利, 尤其对冬季设施农业、林果业生产比较有利。

黑河流域非灌溉地主要分布在流域上、中游祁连山浅山区, 其产量主要取决于生长季降水量的变异。随着黑河流域发源地祁连山区降水的增加, 山区农作物产量明显提高。根据计算生长季降水量与产量相关显著, 5—8 月降水量每增加 10 mm, 粮食单产增长  $84 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ <sup>[12]</sup>; 20 世纪 90 年代后, 黑河流域中、上游地区, 降水明显增多, 对流域内粮食产量起决定作用的春末初夏干旱发生次数和强度都比以往各年代略有减少; 秋季降水量的大幅度增加, 使“秋雨春用”的效应大大增加, 降低了春旱对春季农业生产的影响, 使得该地区农业气候条件明显改善, 主要农作物产量稳步提高。

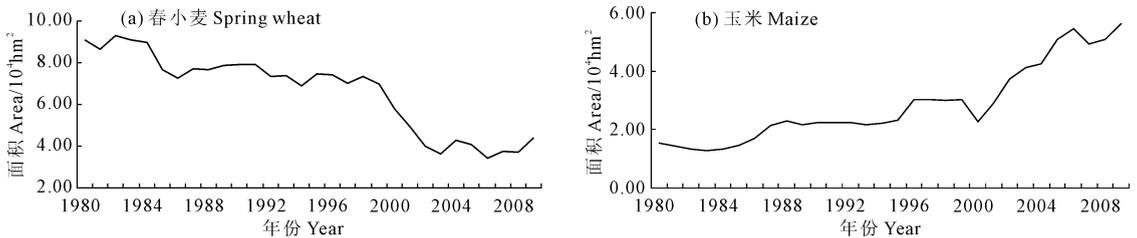


图 7 黑河流域春小麦(a)、玉米(b)历年种植面积变化

Fig. 7 The change of past years planting area of spring wheat(a) and maize(b) in Heihe River basin

### 3.7 对农作物生育期的影响

气候暖湿化对黑河流域主要农作物发育期进程的影响因作物种类而不同, 这从图 8 春小麦和玉米的生育进程变化趋势可以看出。对于春小麦而言, 在近 30 年以来气候暖湿化使生育进程加快, 全生育期缩短。春小麦全生育期日数 20 世纪 80 年代平均为 130 d, 90 年代平均为 129 d, 21 世纪近 10 年平均

为 126 d, 近 10 年来生育期缩短较为明显, 比 80 年代平均缩短了 4 d。玉米是喜温作物, 气候暖湿化有利于延长玉米的全生育期, 20 世纪 80 年代玉米全生育期日数平均为 154 d, 90 年代平均为 163 d, 21 世纪近 10 年平均为 167 d, 比 80 年代延长了 13 d, 发育期天数增加, 使得玉米及大秋农作物产量、品质有了明显提高。

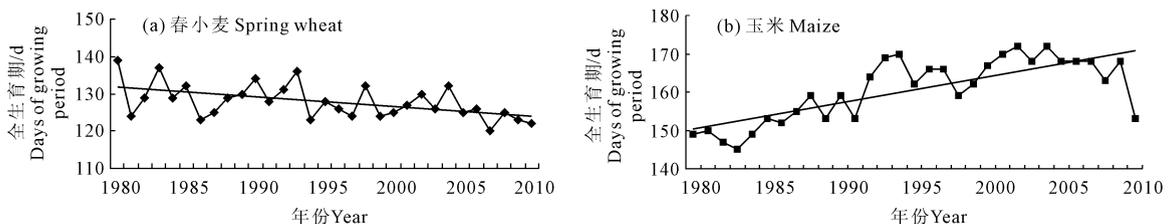


图 8 黑河流域春小麦(a)、玉米(b)历年全生育期变化

Fig. 8 The annual change of development processes of spring wheat(a) and maize(b) in Heihe River basin

## 4 结 论

1) 黑河流域近 50 年来气温持续升高,降水增加,有变暖、增湿的趋势,尤其是 20 世纪 90 年代以后,这种趋势明显加强,最显著的特点是冬季升温幅度最大,秋、冬降水增幅明显。

2) 黑河流域绿洲农业区增温、增湿趋势存在明显的地理差异,上游祁连山区增温、增湿幅度明显大于中、下游绿洲灌溉农业区。

3) 通过对湿润指数分析,近 50 年流域地表并不是一直向着干旱化趋势发展,存在一定的周期波动。20 世纪 80 年代中期以前,呈波动性上升趋势,气候有向暖、湿化发展的趋势,以后由于流域内升温幅度明显大于降水增加的幅度,且上游地区表现的特别明显,这种水、热增长失衡且水、热增长不同季现象,使得流域内湿润指数缓慢下降,导致流域上游祁连山区积雪、冰川加速消融,水资源过度消耗,对未来绿洲农业可持续发展将会产生不利影响。

4) 黑河流域气候暖、湿变化对流域内绿洲农业生产影响明显,一定幅度的增温、增湿对提高粮食作物产量有一定正向作用;气候变化还是流域内作物适宜种植区域发生变化,高耗水、喜温凉气候的作物适宜种植区面积缩小,低耗水、喜温作物适宜种植区面积扩大,种植区域北移,种植海拔高度上限提升。

5) 黑河流域气候暖、湿变化使流域内作物的发育进程发生改变,不同作物对气候变化的响应不同。近 30 年以来,春小麦生育期缩短,尤其近 10 年来生

育期缩短较为明显;气候暖、湿变化有利于玉米等喜温作物正常生长,使玉米生育期延长,产量和品质有了明显提高。

### 参 考 文 献:

- [1] 张厚宣,林而达.中国农业响应全球气候变化的策略问题[J].农业环境保护,1997,16(1):35-39.
  - [2] 王馥棠.近百年我国积温变化与作物产量[J].地理学报,1982,9(3):173-280.
  - [3] 张建平,赵艳霞,王春乙,等.气候变化对我国华北地区东小麦发育和产量影响[J].应用生态学报,2006,17(7):1179-1184.
  - [4] 陶波,李克让,邵雪梅,等.中国陆地净初级生产力时空特征模拟[J].地理学报,2003,58(3):372-380.
  - [5] 李栋梁,吕兰芝.中国农牧交错带的气候特征与演变[J].中国沙漠,2002,22(5):483-488.
  - [6] 姚玉璧,王润元,邓振镛,等.黄土高原半干旱区气候变化及其对马铃薯生长发育的影响[J].应用生态学报,2010,2(2):287-295.
  - [7] 魏凤英.现代气候统计诊断与预测技术[M].北京:气象出版社,2007:72-75.
  - [8] 邢文渊,肖继东,师庆东.巴里坤绿洲 1960—2006 年湿润指数变化[J].沙漠与绿洲气象,2008,2(3):29-32.
  - [9] 孟猛,倪健,张治国.地理生态学的干燥度指数及其应用评述[J].植物生态学报,2004,28(6):853-861.
  - [10] 邓振镛.河西地区垂直气候带与立体农业结构研究[C]//邓振镛.干旱地区气象研究.北京:气象出版社,1999:18.
  - [11] 刘洪兰,张俊国,董安祥,等.张掖市水资源利用现状及未来趋势预测[J].干旱区研究,2008,25(1):35-39.
  - [12] 邓振镛.河西农业气候资源鉴定与农业气候区划[C]//邓振镛.干旱地区气象研究.北京:气象出版社,1999:22.
- 
- (上接第 224 页)
- [20] 刘德祥,董安祥,陆登荣.中国西北地区近 43 年气候变化对农业生产的影响[J].干旱地区农业研究,2005,23(2):195-201.
  - [21] 张强,邓振镛,赵映东,等.全球气候变化对我国西北地区农业的影响[J].生态学报,2008,28(3):1210-1218.
  - [22] 霍治国,李茂松,王丽,等.气候变暖对中国农作物病虫害的影响[J].中国农业科学,2012,45(10):1926-1934.
  - [23] 齐桂英.阿勒泰地区夏季降水变化特征及其预测方法探讨[J].河北农业科学,2010,14(10):144-146.
  - [24] 古丽扎提·哈布肯,赵景波.新疆阿勒泰地区近 50a 来极端气温与降水变化[J].干旱区资源与环境,2011,7(25):112-116.
  - [25] 新疆维吾尔自治区统计局.新疆统计年鉴[M].新疆:中国统计出版社,2010:289-301.
  - [26] 魏凤英.现代气候统计诊断与预测技术[M].北京:气象出版社,1999:42-66.
  - [27] 史建国,张燕卿,何文清,等.黄河流域干燥度时空格局变化研究[J].干旱地区农业研究,2009,27(1):242-247.
  - [28] 龚绍先.粮食作物与气象[M].北京:中国农业大学出版社,1988:491-492.
  - [29] 中国农业科学院.中国农业气象学[M].北京:中国农业出版社,1999:325.
  - [30] 王荣栋,尹经章.作物栽培学[M].北京:高等教育出版社,2005:89.